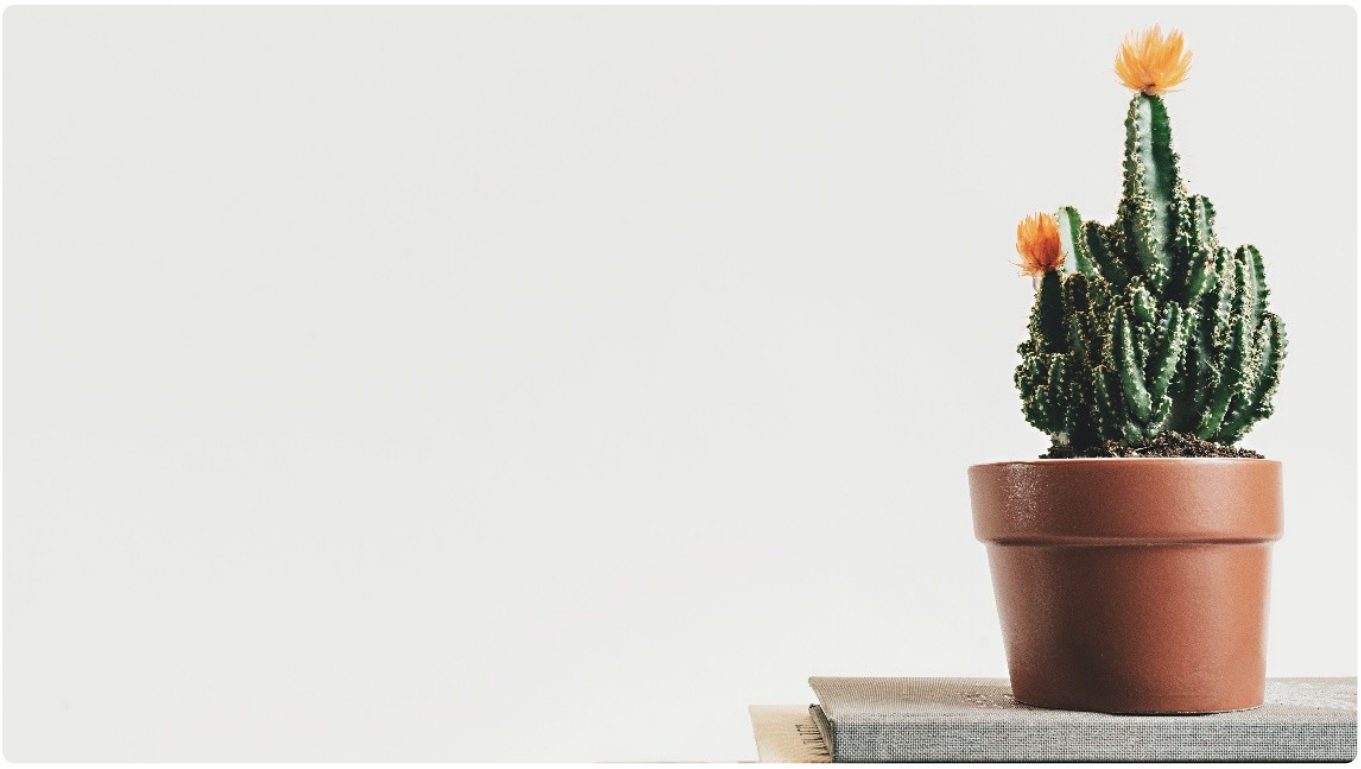
下载APP

16 | Java JIT编译器（四）：Graal的后端是如何工作的？

2020-07-08 宫文学

编译原理实战课 进入课程 >



讲述：宫文学
时长 18:44 大小 17.17M

你好，我是宫文学。

前面两讲中，我介绍了 Sea of Nodes 类型的 HIR，以及基于 HIR 的各种分析处理，这可以看做是编译器的中端。

可编译器最终还是要生成机器码的。那么，这个过程是怎么实现的呢？与硬件架构相关的 LIR 是什么样子的呢？指令选择是怎么做的呢？

这一讲，我就带你了解 Graal 编译器的后端功能，回答以上这些问题，破除你对后端处过程的神秘感。

首先，我们来直观地了解一下后端处理的流程。

后端的处理流程

在第 14 讲中，我们在运行 Java 示例程序的时候（比如atLeastTen()方法），使用了“-Dgraal.Dump=:5”的选项，这个选项会 dump 出整个编译过程最详细的信息。

对于 HIR 的处理过程，程序会通过网络端口，dump 到 IdealGraphVisualizer 里面。而后端的处理过程，缺省则会 dump 到工作目录下的一个“graal_dumps”子目录下。你可以用文本编辑器打开查看里面的信息。

复制代码

```
//至少返回10
public int atLeastTen(int a){
    if (a < 10)
        return 10;
    else
        return a;
}
```

不过，你还可以再偷懒一下，使用一个图形工具c1visualizer来查看。

补充：c1visualizer 原本是用于查看 Hopspot 的 C1 编译器（也就是客户端编译器）的 LIR 的工具，这也就是说，Graal 的 LIR 和 C1 的是一样的。另外，该工具不能用太高版本的 JDK 运行，我用的是 JDK1.8。

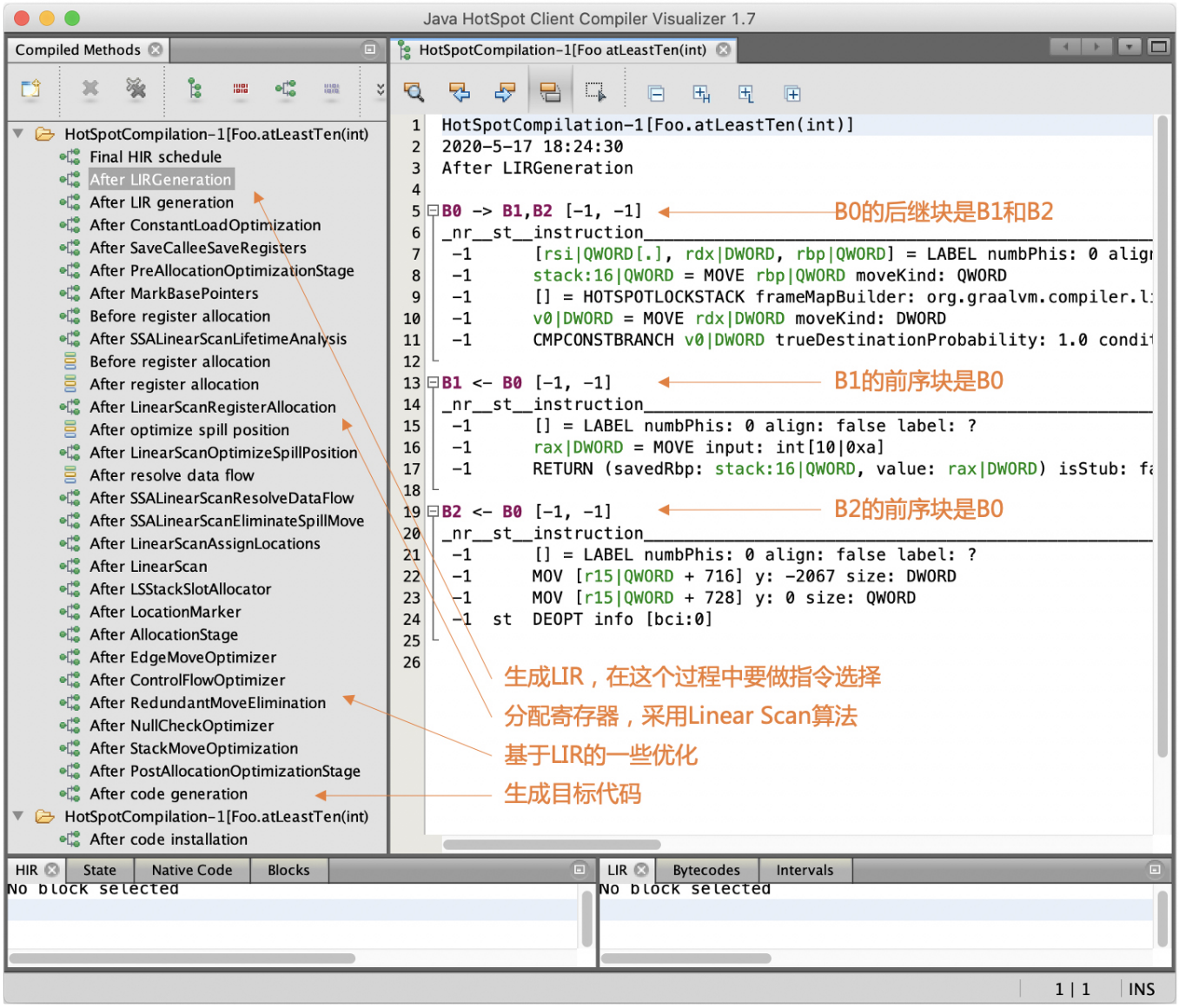


图 1：atLeatTen() 方法对应的 LIR

在窗口的左侧，你能看到后端的处理流程。

首先是把 HIR 做最后一次排序（HIR Final Schedule），这个处理会把 HIR 节点分配到基本块，并且排序；

第二是生成 LIR，在这个过程中要做指令选择；

第三，寄存器分配工作，Graal 采用的算法是线性扫描（Linear Scan）；

第四，是基于 LIR 的一些优化工作，比如 ControlFlowOptimizer 等；

最后一个步骤，是生成目标代码。

接下来，我们来认识一下这个 LIR：它是怎样生成的，用什么数据结构保存的，以及都有什么特点。

认识 LIR

在对 HIR 的处理过程中，前期（High Tier、Mid Tier）基本上都是与硬件无关。到了后期（Low Tier），你会看到 IR 中的一些节点逐步开始带有硬件的特征，比如上一讲中，计算 AMD64 地址的节点。而 LIR 就更加反映目标硬件的特征了，基本上可以跟机器码一对一地翻译。所以，从 HIR 生成 LIR 的过程，就要做指令选择。

我把与 LIR 相关的包和类整理成了类图，里面划分成了三个包，分别包含了与 HIR、LIR 和 CFG 有关的类。你可以重点看看它们之间的相互关系。

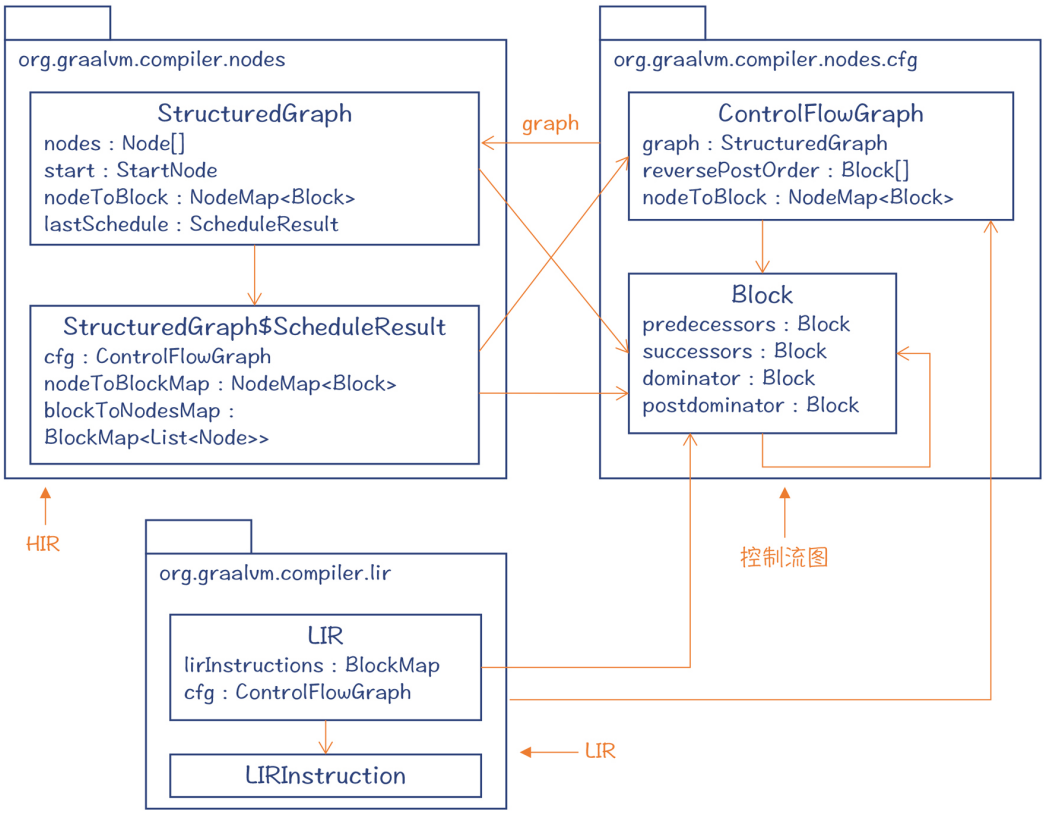


图 2：HIR、LIR 和 CFG 的关联关系

在 HIR 的最后的处理阶段，程序会通过一个 Schedule 过程，把 HIR 节点排序，并放到控制流图中，为生成 LIR 和目标代码做准备。我之前说过，HIR 的一大好处，就是那些浮动节点，可以最大程度地免受控制流的约束。但在最后生成的目标代码中，我们还是要把每行指令归属到某个具体的基本块的。而且，基本块中的 HIR 节点是按照顺序排列的，在 ScheduleResult 中保存着这个顺序（blockToNodesMap 中顺序保存了每个 Block 中的节点）。

你要注意，这里所说的 Schedule，跟编译器后端的指令排序不是一回事儿。这里是把图变成线性的程序；而编译器后端的指令排序（也叫做 Schedule），则是为了实现指令级并行的优化。

当然，把 HIR 节点划分到不同的基本块，优化程度是不同的。比如，与循环无关的代码，放在循环内部和外部都是可以的，但显然放在循环外部更好一些。把 HIR 节点排序的 Schedule 算法，复杂度比较高，所以使用了很多**启发式**的规则。刚才提到的把循环无关代码放在循环外面，就是一种启发式的规则。

图 2 中的 ControlFlowGraph 类和 Block 类构成了控制流图，控制流图和最后阶段的 HIR 是互相引用的。这样，你就可以知道 HIR 中的每个节点属于哪个基本块，也可以知道每个基本块中包含的 HIR 节点。

做完 Schedule 以后，接着就会生成 LIR。**与声明式的 HIR 不同，LIR 是命令式的，由一行行指令构成。**

图 1 显示的是 Foo.atLeatTen 方法对应的 LIR。你会看到一个控制流图（CFG），里面有三个基本块。B0 是 B1 和 B2 的前序基本块，B0 中的最后一个语句是分支语句（基本块中，只有最后一个语句才可以是导致指令跳转的语句）。

LIR 中的指令是放到基本块中的，LIR 对象的 LIRInstructions 属性中，保存了每个基本块中的指令列表。

OK，那接下来，我们来看看 LIR 的指令都有哪些，它们都有什么特点。

LIRInstruction 的子类，主要放在三个包中，你可以看看下面的类图。

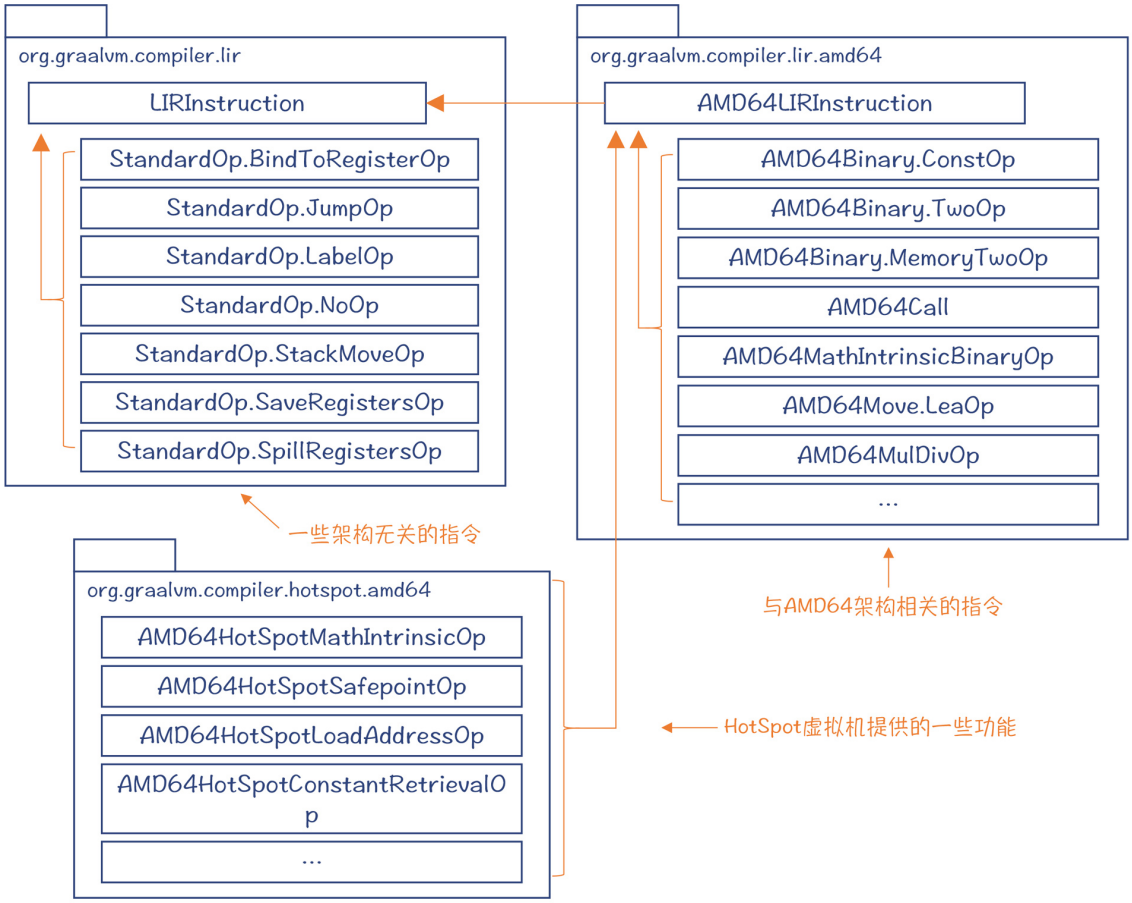


图 3：LIR 中的指令类型

首先，在 **org.graalvm.compiler.lir 包**中，声明了一些与架构无关的指令，比如跳转指令、标签指令等。因为无论什么架构的 CPU，一定都会有跳转指令，也一定有作为跳转目标的标签。

然后，在 **org.graalvm.compiler.lir.amd64 包**中，声明了几十个 AMD64 架构的指令，为了降低你的阅读负担，这里我只列出了有代表性的几个。这些指令是 LIR 代码中的主体。

最后，在 **org.graalvm.compiler.hotspot.amd64 包**中，也声明了几个指令。这几个指令是利用 HotSpot 虚拟机的功能实现的。比如，要获取某个类的定义的地址，只能由虚拟机提供。

好了，通过这样的一个分析，你应该对 LIR 有更加具体的认识了：**LIR 中的指令，大多数是与架构相关的。**这样才适合运行后端的一些算法，比如指令选择、寄存器分配等。你也可以据此推测，其他编译器的 LIR，差不多也是这个特点。

接下来，我们就来了解一下 Graal 编译器是如何生成 LIR，并且在这个过程中，它是如何实现指令选择的。

生成 LIR 及指令选择

我们已经知道了，Graal 在生成 LIR 的过程中，要进行指令选择。

我们先看一下 Graal 对一个简单的示例程序 Foo.add1，是如何生成 LIR 的。

复制代码

```
1 public static int add1(int x, int y){
2     return x + y + 10;
3 }
```

这个示例程序，在转 LIR 之前，它的 HIR 是下面这样。其中有两个加法节点，操作数包括了参数（ParameterNode）和常数（ConstantNode）两种类型。最后是一个 Return 节点。这个例子足够简单。实际上，它简单到只是一棵树，而不是图。

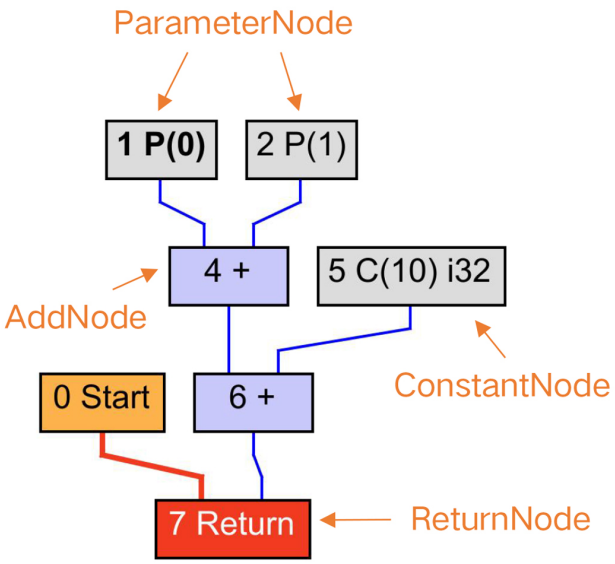


图 4：add1 方法对应的 HIR

你可以想一下，对于这么简单的一棵树，编译器要如何生成指令呢？

最简单的方法，是做一个语法制导的简单翻译。我们可以深度遍历这棵树，针对不同的节点，分别使用不同的规则来生成指令。比如：

在遇到参数节点的时候，我们要搞清楚它的存放位置。因为参数要么是在寄存器中，要么是在栈中，可以直接用于各种计算。

遇到常数节点的时候，我们记下这个常数，用于在下一条指令中作为立即数使用。

在遇到加法节点的时候，生成一个 add 指令，左右两棵子树的计算结果分别是其操作数。在处理到 6 号节点的时候，可以不用 add 指令，而是生成一个 lea 指令，这样可以直接把结果写入 rax 寄存器，作为返回值。这算是一个优化，因为可以减少一次从寄存器到寄存器的拷贝工作。

遇到 Return 节点的时候，看看其子树的计算结果是否放在 rax 寄存器中。如果不是，那么就要生成一个 mov 指令，把返回值放入 rax 寄存器，然后再生成一条返回指令（ret）。通常，在返回之前，编译器还要做一些栈帧的处理工作，把栈指针还原。

对于这个简单的例子来说，按照这个翻译规则来生成代码，是完全没有问题的。你可以看下，Graal 生成 LIR，然后再基于 LIR 生成的目标代码的示例程序，它只有三行，足够精简和优化：

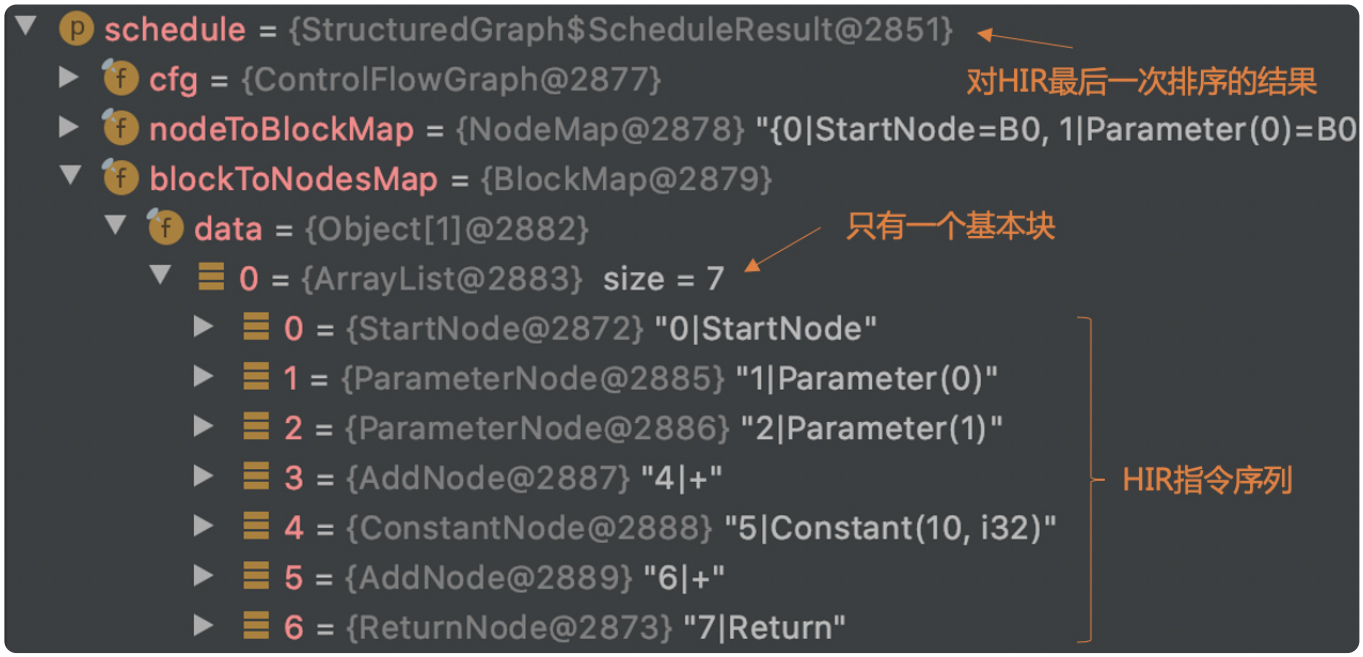
复制代码

```
1 add    esi,edx        #将参数1加到参数0上，结果保存在esi寄存器
2 lea    eax,[rsi+0xa] #将rsi加10,结果放入eax寄存器
3 ret                   #返回
```

补充：
1. 我去掉了一些额外的汇编代码，比如用于跟 JVM 握手，让 JVM 有机会做垃圾收集的代码。
2. lea 指令原本是用于计算地址的。上面的指令的意思是把 rsi 寄存器的值作为地址，然后再偏移 10 个字节，把新的地址放到 eax 寄存器。
x86 计算机支持间接寻址方式：**偏移量（基址，索引值，字节数）**
其地址是：**基址 + 索引值 * 字节数 + 偏移量**
所以，你可以利用这个特点，计算出a+b*c+d的值。但 c（也就是字节数）只能取 1、2、4、8。就算让 c 取 1，那也能完成a+b+c的计算。并且，它还可以在另一个操作数里指定把结果写到哪个寄存器，而不像 add 指令，只能从一个操作数加到另一个操作数上。这些优点，使得 x86 汇编中经常使用 lea 指令做加法计算。

Graal 编译器实际上大致也是这么做的。

首先，它通过 Schedule 的步骤，把 HIR 的节点排序，并放入基本块。对于这个简单的程序，只有一个基本块。



接着，编译器会对基本块中的节点做遍历（参考：NodeLIRBuilder.java 中的代码）。针对每个节点转换（Lower）成 LIR。

把参数节点转换成了 MoveFromRegOp 指令，在示例程序里，其实这是冗余的，因为可以直接把存放参数的两个寄存器，用于加法计算；

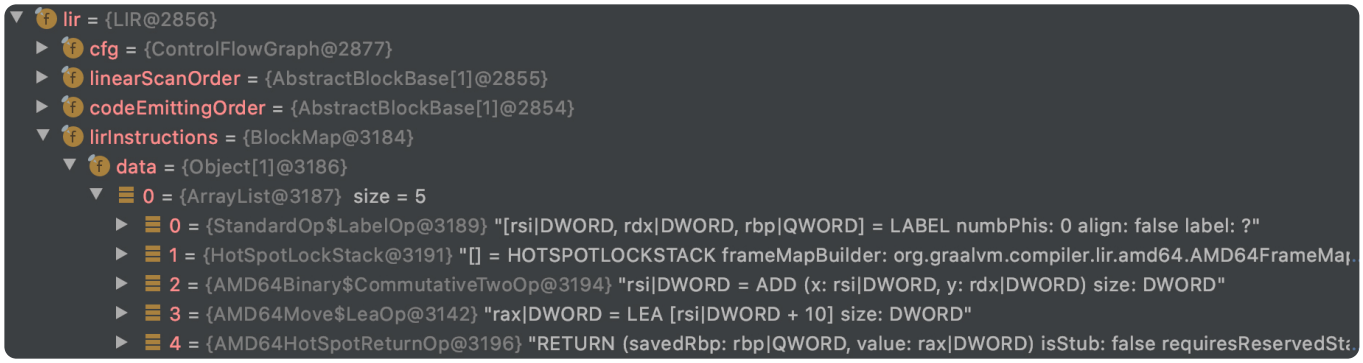
把第一个加法节点转换成了 CommutativeTwoOp 指令；

把第二个加法节点转换成了 LeaOp 指令，并且把常数节点变成了 LeaOp 指令的操作数；

Return 节点生成了两条指令，一条是把加法运算的值放到 rax 寄存器，作为返回值，这条我们知道是冗余的，所以就要看看后面的优化算法如何消除这个冗余；第二条是返回指令。

一开始生成的 LIR，使用的寄存器都是虚拟的寄存器名称，用 v1、v2、v3 这些来表示。等把这些虚拟的寄存器对应到具体的物理寄存器以后，就可以消除掉刚才提到的冗余代码了。

我们在 c1visualizer 中检查一下优化过程，可以发现这是在 LinearScanAssignLocationsPhase 做的优化。加法指令中对参数 1 和参数 2 的引用，变成了对物理寄存器的引用，从而优化掉了两条指令。lea 指令中的返回值，也直接赋给了 rax 寄存器。这样呢，也就省掉了把计算结果 mov 到 rax 的指令。这样优化后的 LIR，基本上已经等价于目标代码了。



好了，通过这样一个分析，你应该理解了从 HIR 生成 LIR 的过程。但是还有个问题，这中间似乎也没有做什么指令选择呀？唯一的一处，就是把加法操作优化成了 lea 指令。而这个也比较简单，基于单独的 Add 节点就能做出这个优化选择。**那么，更复杂的模式匹配是怎么做的呢？**

不要着急，我们接下来就看看 Graal 是如何实现复杂一点的指令选择的。这一次，我们用了另一个示例程序：Foo.addMemory 方法。它把一个类成员变量 m 和参数 a 相加。

复制代码

```
public class Foo{
    static int m = 3;
    public static int addMemory(int a){
        return m + a;
    }
    ...
}
```

这跟 add1 方法有所不同，因为它要使用一个成员变量，所以一定要访问内存。而 add1 方法的所有操作，都是在寄存器里完成的，是“空中作业”，根本不在内存里落地。

我们来看一下这个示例程序对应的 HIR。其中一个黄色节点“Read#Foo.m”，是读取内存的节点，也就是读取成员变量 m 的值。而这又需要通过 AMD64Address 节点来计算 m 的地址。由于 m 是个静态成员，所以它的地址要通过类的地址加上一定的偏移量来计算。

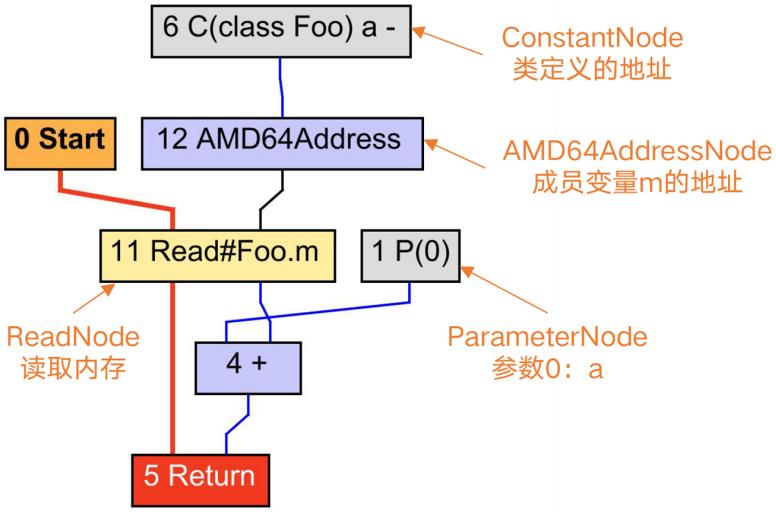


图 5：addMemory() 方法对应的 HIR

这里有一个小的知识点，我在第 14 讲中也提过：对内存操作的节点（如图中的 ReadNode），是要加入控制流中的。因为内存里的值，会由于别的操作而改变。如果你把它变成浮动节点，就有可能破坏对内存读写的顺序，从而出现错误。

回到主题，我们来看看怎么为 addMemory 生成 LIR。

如果还是像处理 add1 方法一样，那么你就会这么做：

计算 m 变量的地址，并放入一个寄存器；

基于这个地址，取出 m 的值，放入另一个寄存器；

把 m 的值和参数 a 做加法。

不过这样做，至少要生成 3 条指令。

在第 8 讲中我曾经讲过，像 AMD64 这样使用复杂指令集（CICS）的架构，具有强大的地址表达能力，并且可以在做算术运算的时候，直接使用内存。所以上面的三条指令，其实能够缩减成一条指令。

这就需要编译器把刚才这种基于内存访问做加法的模式识别出来，以便生成优化的 LIR，进而生成优化的目标代码。这也是指令选择算法要完成的任务。可是，**如何识别这种模式呢？**

跟踪 Graal 的执行，你会发现 HIR 在生成 LIR 之前，有一个对基本块中的节点做模式匹配的操作，进而又调用匹配复杂表达式（matchComplexExpressions）。在这里，编译器会把节点跟一个个匹配规则（MatchStatement）做匹配。**注意**，匹配的时候是逆序做的，相当于从树根开始遍历。

在匹配加法节点的时候，Graal 匹配上了一个 MatchStatement，这个规则的名字叫“addMemory”，是专门针对涉及内存操作的加法运算提供的一个匹配规则。这个 MatchStatement 包含了一个匹配模式（MatchPattern），该模式的要求是：

节点类型是 AddNode；

第一个输入（也就是子节点）是一个值节点（value）；

第二个输入是一个 ReadNode，而且必须只有一个使用者（singleUser=true）。

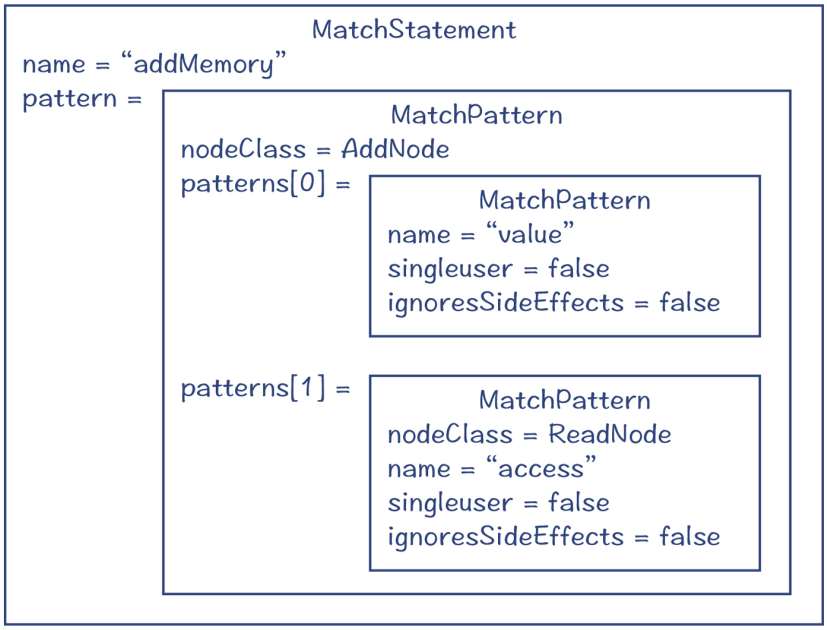
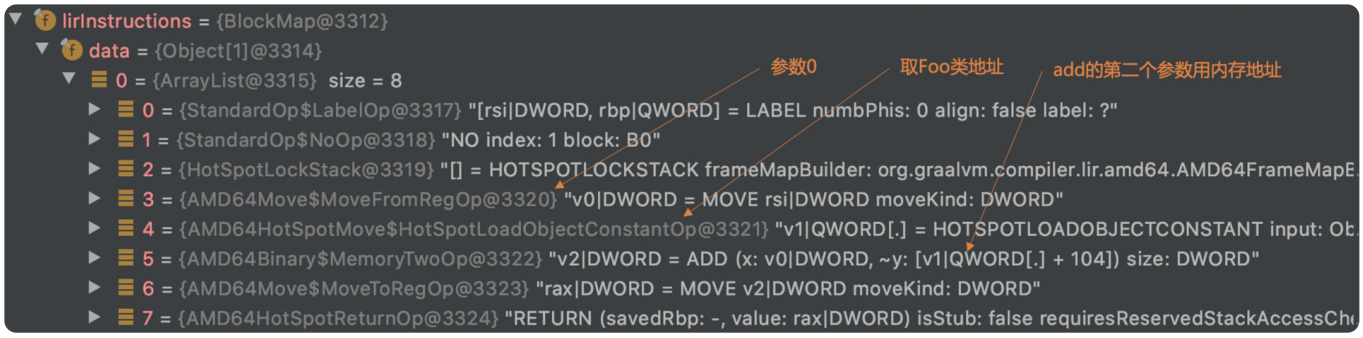


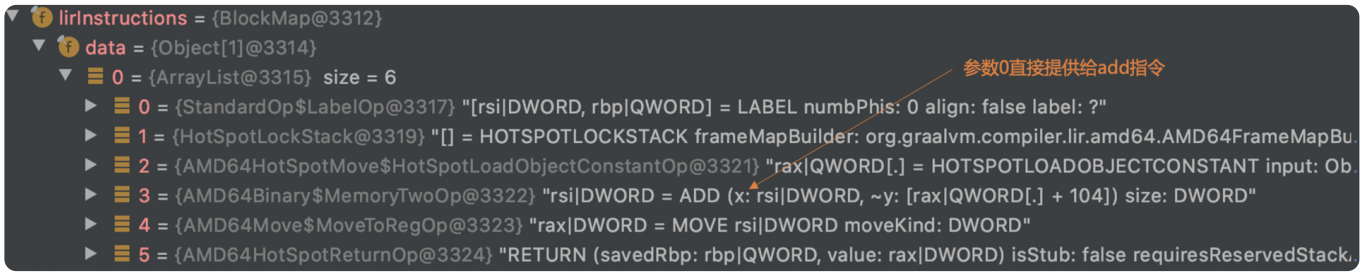
图 6：匹配规则和匹配模式

这个 MatchStatement 是在AMD64NodeMatchRules中用注解生成的。利用这样的一个匹配规则，就能够匹配示例程序中的 Add 节点。

匹配上以后，Graal 会把 AddNode 和 ReadNode 做上特殊标记，这样在生成 LIR 的时候，就会按照新的生成规则。生成的 LIR 如下：



你可以发现，优化后，编译器把取参数 a 的指令省略掉了，直接使用了传入参数 a 的寄存器 rsi：



最后生成的目标代码如下：

复制代码

```
1 movabs rax,0x797b00690           #把Foo类的地址放入rax寄存器
2 add    esi,DWORD PTR [rax+0x68] #偏移0x68后，是m的地址。做加法
3 mov    eax,esi                   #设置返回值
4 ret                              #返回
```

到目前为止，你已经了解了 Graal 是如何匹配一个模式，并选择优化的指令的了。

你可以看看AMD64NodeMatchRules类，它的里面定义了不少这种匹配规则。通过阅读和理解这些规则，你就会对为什么要做指令选择有更加具体的理解了。

Graal 的指令选择算法算是比较简单的。在 HotSpot 的 C2 编译器中，指令选择采用的是 BURS（Bottom-Up Rewrite System，自底向上的重写系统）。这个算法会更加复杂一点，消耗的时间更长，但优化效果更好一些。

这里我补充一个分享，我曾经请教过 ARM 公司的研发人员，他们目前认为 Graal 对针对 AArch64 的指令选择是比较初级的，你可以参考这个幻灯片。所以，他们也正在帮助 Graal 做改进。

后端的其他功能

出于突出特色功能的目的，这一讲我着重讲了 LIR 的特点和指令选择算法。不过在考察编译器的后端的时候，我们通常还要注意一些其他功能，比如寄存器分配算法、指令排序，等等。我这里就把 Graal 在这些功能上的实现特点，给你简单地介绍一下，你如果有兴趣的话，可以根据我的提示去做深入了解：

寄存器分配：Graal 采用了线性扫描（Linear Scan）算法。这个算法的特点是速度比较快，但优化效果不如图染色算法。在 HotSpot 的 C2 中采用的是后者。

指令排序：Graal 没有为了实现指令级并行而去做指令排序。这里一个主要原因，是现在的很多 CPU 都已经支持乱序（out-of-order）执行，再做重排序的收益不大。

窥孔优化：Graal 在生成 LIR 的时候，会做一点窥孔优化（AMD64NodeLIRBuilder 类的peephole方法）。不过它的优化功能有限，只实现了针对除法和求余数计算的一点

优化。

从 LIR 生成目标代码：由于 LIR 已经跟目标代码很接近了，所以这个翻译过程已经比较简单，没有太难的算法了，需要的只是了解和熟悉汇编代码和调用约定。

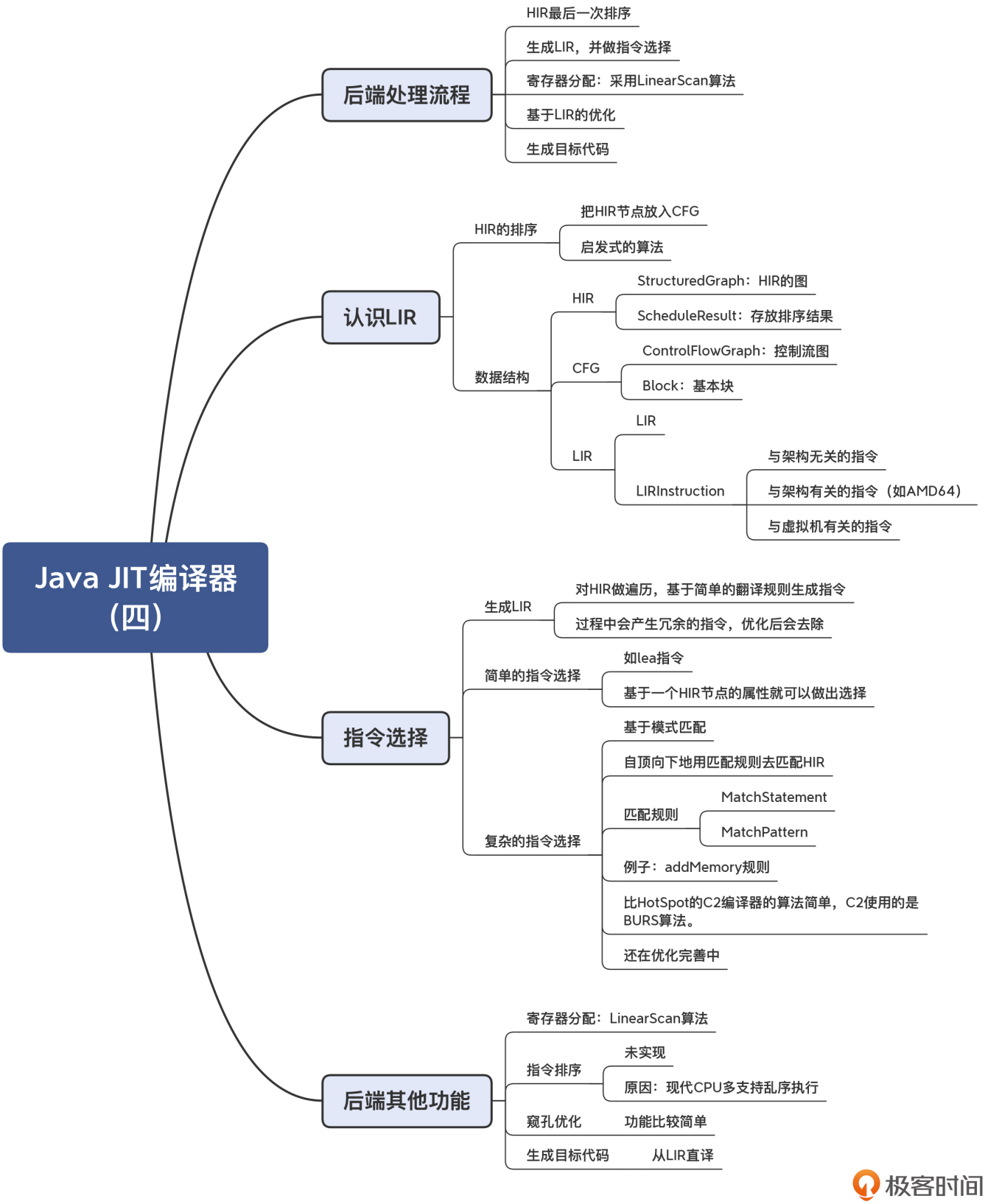
课程小结

这一讲，我带你对 Graal 的后端做了一个直观的认识，让你的后端知识有了第一个真实世界中编译器的参考系。

第一，把 LIR 从比较抽象的概念中落地。你现在可以确切地知道哪些指令是必须跟架构相关的，而哪些指令可以跟架构无关。

第二，把指令选择算法落地。虽然 Graal 的指令选择算法并不复杂，但这毕竟提供了一个可以借鉴的思路，是你认知的一个阶梯。如果你仔细阅读代码，你还可以具象地了解到，符合哪些模式的表达式，是可以从指令选择中受益的。这又是一个理论印证实践的点。

我把这讲的思维导图也放在了下面，供你参考。



同时，这一讲之后，我们对 Java 编译器的探讨也就告一段落了。但是，我希望你对它的研究不要停止。

我们讨论的两个编译器（javac 和 Graal）中的很多知识点，你只要稍微深入挖掘一下，就可以得出不错的成果了。比如，我看到有国外的硕士学生研究了一下 HotSpot，就可以发表不错的论文。如果你是在校大学生，我相信你也可以通过顺着这门课程提供的信息做

一些研究，从而得到不错的成果。如果是已经工作的同学，我们可以在极客时间的社群（比如留言区和部落）里保持对 Java 编译技术的讨论，也一定会对于你的工作有所助益。

一课一思

请你阅读AMD64NodeMatchRules中的匹配规则，自己设计另一个例子，能够测试出指令选择的效果。如果降低一下工作量的话，你可以把它里面的某些规则解读一下，在留言区发表你的见解。

好，就到这里。感谢你的阅读，欢迎你把今天的内容分享给更多的朋友，我们下一讲再见。

提建议

© 版权归极客邦科技所有，未经许可不得传播售卖。 页面已增加防盗追踪，如有侵权极客邦将依法追究其法律责任。

上一篇 15 | Java JIT编译器（三）：探究内联和逃逸分析的算法原理

下一篇 17 | Python编译器（一）：如何用工具生成编译器？

精选留言 (1)

写留言

智昂张智恩震

2020-07-08

请问和JVM握手就是插入safe point的过程吗？具体的握手是在做什么？

作者回复: 在安全点插入代码，是在编译期去做的。在运行期是去执行这些代码。
在这里，安全点的代码主要服务于垃圾收集目的。在JVM做垃圾收集的时候，各个线程都要停在安全点上。那么程序运行到这里的时候，就可以去运行一段代码，检查一下是否正要做垃圾收集，如果是的话，就先把线程停下来。否则，就继续执行。
在安全点插入代码还可以实现其他作用。比如，你可以在这里实现抢占式的并发调度功能，像Go的Goroutine就有这种调度机制。
所以说，编译器生成的目标代码要跟运行时机制相结合，这也是我们在第三篇会着重讲运行时机制的原因。上述说的两种情况，在第三篇讲垃圾收集和并发机制的时候，都会讲到。